

特集 | 新しいD-RIEプロセスにおけるSi/SiO₂マスクエッチング選択比の向上*

Improvement of Si/SiO₂ Mask Etching Selectivity in the New D-RIE Process

大原 淳士 加納 一彦 竹内 幸裕 大塚 義則
 Junji OHARA Kazuhiko KANO Yukihiro TAKEUCHI Yoshinori OTSUKA

This paper describes an improvement of Si/SiO₂ mask etching selectivity in the new D-RIE (Deep Reactive Ion Etching) process that we presented in MEMS 2000¹⁾ This process, which repeats the conventional D-RIE (ASE process) and O₂ plasma irradiation processes alternately, can improve the aspect ratio due to the prevention of lateral etching. However, the SiO₂ mask erosion of this process was 2.7 times as high as that of the conventional D-RIE process because the SiO₂ mask was sputtered by oxygen ion in the O₂ plasma irradiation process. Therefore the highest aspect ratio, 46 was restricted by mask consumption. In this study, we suppressed the SiO₂ mask consumption. This suppression improves etching selectivity and increases the highest aspect ratio up to 60. Furthermore, the required process time is reduced to 2/3 of the prior result.

Key words : Sensor, Selectivity, D-RIE, Aspect ratio

1. 序論

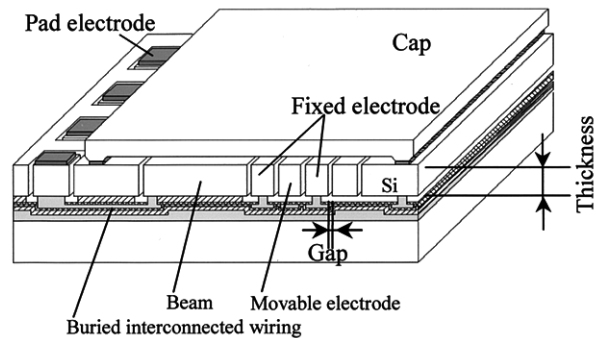
微細加工が可能な半導体プロセスを用いてセンサ構造体を形成する「半導体センサ」は、既存のセンサを小型、低コストで高機能なものに置き換えられるポテンシャルを秘めており、自動車関連でもいち早く実用化されつつある。すでに、歪みゲージを用いた圧力センサや、エアバッグ用の加速度センサ等が量産化されてきた。

ここ数年の動きとして加速度センサや、車両が旋回したときの角速度を検出するジャイロは、より小型化が可能な容量式に替わりつつある。この容量式では櫛歯状の固定電極と可動電極が対向しており、加速度等の検出物理量により電極間隔が変化するので、その静電容量変化で検出する構造をとっている。この静電容量を決めるのは電極の間隔とその厚さの比であり、これはアスペクト比と呼ばれている (Fig.1)。

このアスペクト比によって検出部分の単位面積当たりの静電容量が決まる。従って、静電容量の要求スペックが一定であれば、アスペクト比を高くとるほどセンサエレメント (検出) 部分の専有面積を縮小させることができる。

製造プロセスからみた場合、このような櫛歯構造はSi基板にマスク材を堆積して、所定の場所に溝 (トレンチ) を形成するトレンチエッチング技術によって形成される。先の櫛歯状電極の厚さと間隔は、トレンチの深さと幅に相当する。つまり、トレンチエッチング

技術は容量式半導体センサを小型化する上で、キーとなる要素技術である。ここ2~3年、高アスペクト比トレンチエッチング技術、およびこの技術を応用した各種デバイス開発が半導体センサの分野で急速に普及しつつあり、この分野はD-RIE (Deep Reactive Ion Etching) 技術と呼ばれている。



Aspect ratio: Thickness/Gap

Fig.1 Capacitive accelerometer

我々はこれまでにFig.2に示す新しいD-RIEプロセスを開発した¹⁾²⁾。このプロセスは、通常のD-RIEプロセス (ASEプロセス) とO₂ プラズマ照射プロセスを交互に実行するため、ポリマー膜と酸化膜からなる2重の保護膜をトレンチ側壁面に形成する。この2重保護膜は横方向へのエッチングをほとんど完全に阻止できるので、通常のD-RIEプロセスと比較して最大アス

* IEEE の了解を得て、下記を和訳し一部加筆して転載

^{1)2001 IEEE, Reprinted with permission, from "IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference Technical Digest 2001", "IMPROVEMENT OF Si/SiO₂ MASK ETCHING SELECTIVITY IN THE NEW D-RIE PROCESS"}

ペクト比が2倍程度に向上する．しかしながらこのプロセスでは、 O_2 プラズマ照射プロセスでの酸素イオンのスパッタリング作用により、ウェハ表面のマスク材 (SiO_2 マスク) が著しく消耗されるため、そのエッチングはマスク材の消滅によって限定され、アスペクト比：46 が限界であった．

そこで我々は、この新しいD-RIE プロセスにおけるマスク材 (SiO_2) の消耗を抑えて見かけ上のSi基板とマスク材の選択比を向上させることを狙って、 O_2 プラズマ照射時のプラズマ状態を計測しつつマスク材へのスパッタ効果が最小になるようにこれを適正化した．また、ASEプロセス自体に関しても、そのエッチング異方性が基板温度に依存することに着目し、プロセス中の基板温度を下げた．本稿ではこれらの手法によって最大アスペクト比が向上した点に関して述べる．

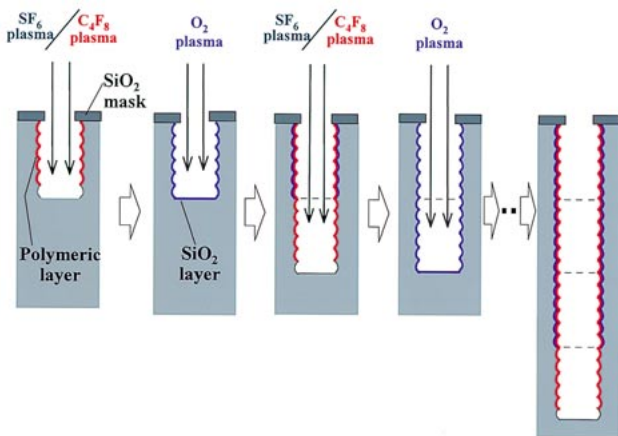


Fig.2 New D-RIE process (Dual sidewall protection layer process)

2. O_2 プラズマの照射効果

最初に我々は、 O_2 プラズマ生成時のパラメータとその照射によるSi表面への SiO_2 膜の形成レート、およびマスク材の消耗レートの関係について考察した． O_2 プラズマ照射時、大部分の入射酸素イオンはウェハに対して垂直であるが、入射するイオンは角度分布を持つため、トレンチ側壁面は斜め入射イオンによって衝撃を受ける (Fig.3)．

常温下のSi基板表面の酸化は、酸素雰囲気中でのイオン衝撃が主要因となって生じることが報告されている³⁾．そこで我々は、トレンチ側壁面での SiO_2 膜の形成は、酸素ラジカルまたは酸素原子が吸着したSi表面を、酸素イオンがたたくことによってSi-O結合が生じることによって進むと推察し、 SiO_2 膜の形成レ

ートは O_2 プラズマ中のイオン密度 (N_i) とイオンの運動エネルギー (E_i) の積で表される反応確率に比例すると仮定した．

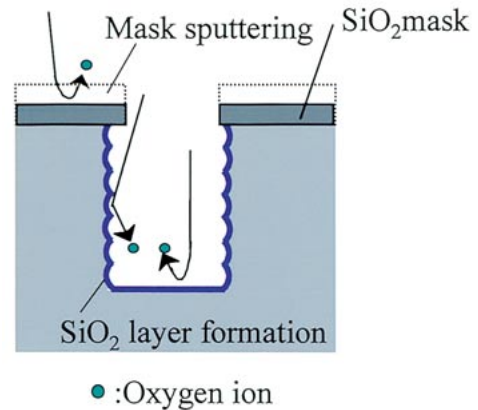


Fig.3 O_2 plasma irradiation effect

一方ウェハ表面のマスク材 (SiO_2 マスク) は、物理的にスパッタされ、そのスパッタレートは、 E_i に依存する．仮に側壁面上での SiO_2 膜の形成レートのみを増加させることができれば、側壁面を保護するのに十分な膜厚を持った SiO_2 膜の形成に必要となる O_2 プラズマ照射時間を短縮できるため、その間に生じるマスク材の消耗は抑制できる．しかし、 E_i を増加させれば SiO_2 膜の形成レートと共にスパッタレートも増加する．そこで我々は E_i の代わりに N_i を増加させて、側壁面での SiO_2 膜の形成レートを高め、マスク材の消耗を抑えることを試みた．

3. O_2 プラズマ状態の計測

我々のICP (誘導結合型プラズマ) エッチング装置ではFig.4に示すように O_2 プラズマ状態は O_2 ガス流量、添加ガスとしてのArガス流量、チャンバ圧力、プラズマ生成RFパワー、およびバイアスRFパワーによって決定される．このうち、バイアスRFパワーを上げると上述の E_i も増加するため、本研究ではバイアスRFパワーは一定とした．バイアスRFパワーが一定のとき、上述の N_i が増加するとプラズマ自体のインピーダンスが低下するために、Fig.4に示す V_{pp} (バイアスRF電極のピーク間電圧) は低下する．そこで我々は V_{pp} をモニターすることで、 N_i を評価した．

さらに我々は、 SiO_2 膜の形成レートを評価するために、 O_2 プラズマ照射によって形成された SiO_2 膜の膜厚をその場計測する方法を考案した．この計測では、ベアSiウェハに対して O_2 プラズマと SF_6 プラズマを順

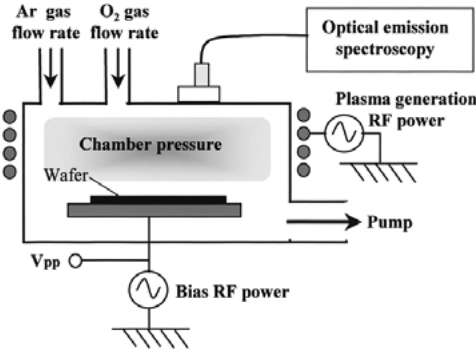


Fig.4 Parameters and measurements of O₂ plasma

番に照射し、それらのプラズマからの発光を発光分光器を用いてFig.4に示す構成で測定した。この過程を通してウェハ表面は一旦O₂プラズマで酸化され、そして形成されたSiO₂膜はSF₆プラズマによって除去される。SF₆プラズマ中にSiウェハが存在した場合、FがSiウェハとのエッチング反応によって消費されるため、SF₆プラズマ中のFからの発光(λ = 703.7nm)は低下すると報告されている⁴⁾。そのため、我々の計測方法では、O₂プラズマによって形成されたSiO₂膜がSF₆プラズマによって完全に除去された時点でSi表面がプラズマに露出するため、Fからの発光は低下する。

Fig.5にSF₆プラズマからの発光をモニターした例を示す。プラズマはT = t₀でONとなり、SiO₂膜が除去された時(T = t₁)、発光レベルが低下する。SiO₂膜はSF₆プラズマに抗してTと示された時間、存在したことを示している。TはSiO₂膜厚に比例して長くなると考えられる。このようにして、我々はTをモニターしてO₂プラズマ照射で形成されたSiO₂膜厚を間接的に計測し、同一のO₂プラズマ照射時間に対してTが最大となるようにプラズマパラメータを適性

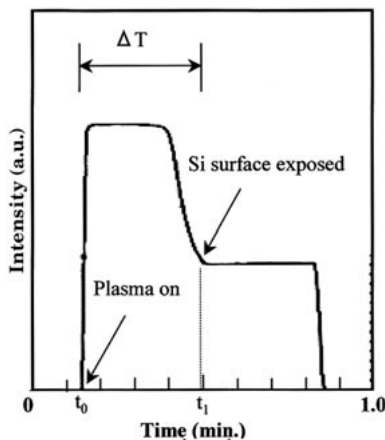


Fig.5 Measuring example of optical emission (λ = 703.7nm) from SF₆ plasma

化した。

4. プラズマ状態の適正化

次に我々は、SiO₂膜形成の高速化に向けてO₂プラズマ条件を適正化するためにV_{pp}とTを計測した。V_{pp}はガス圧を下げた場合に低下した(Fig.6)。また、プラズマ生成RFパワーを上げた場合、そしてArガスを添加した場合に低下した(Fig.7)。これらの条件下では、同一のO₂プラズマ照射時間(30s)におけるTも同様に増加した。従って、これらの条件下ではN_iが増加したことによってSiO₂膜の形成レートが上がったと考えられる。

一方、O₂ガス流量を増加させた場合、同一のO₂プラズマ照射時間(30s)に対するTは増加したがV_{pp}は変化しなかった。このことからO₂ガス流量は、N_iに寄与するのではなく、反応種である酸素ラジカルの供給量に寄与すると考えられる。

こうして我々は、Table 1に示すようにO₂プラズマの生成条件を適正化した。両条件下での測定したV_{pp}もTable 1に示す。

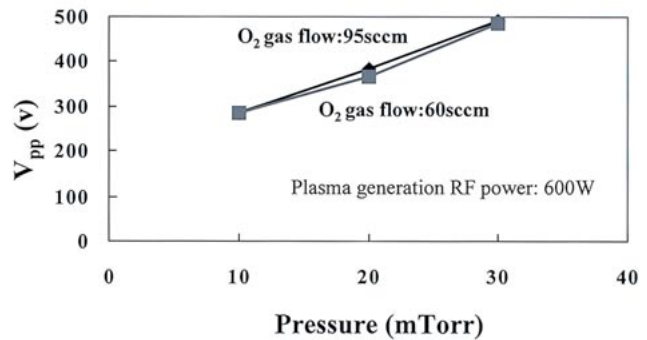


Fig.6 The V_{pp} dependence on chamber pressure

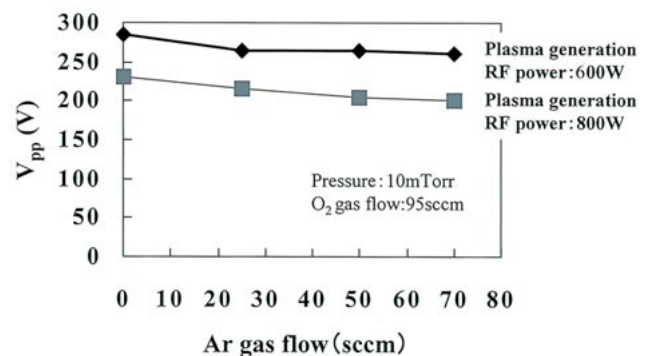


Fig.7 The V_{pp} dependence on plasma generation RF power and Ar gas addition

適正化条件ではV_{pp}が低下しており、N_iが増加していると考えられる。そこで次に、従来条件と適正化条

Table 1 Comparison of the plasma parameters and the monitored V_{pp} between the prior condition and the optimized condition

	Prior condition	Optimized condition
O ₂ gas flow	60sccm	95sccm
Ar gas flow	0sccm	70sccm
Chamber pressure	30mTorr	10mTorr
Plasma generation RF power	600W	600W
Bias RF power	25W	25W
V _{pp} (monitored)	485V	200V

件でSiO₂膜形成レートを比較した。この実験では、両条件下でO₂プラズマ照射時間に対する ΔT を計測した (Fig.8)。 ΔT は膜厚に比例すると考えられるため、このグラフはSiO₂膜厚のO₂プラズマ照射時間依存性を示している。従来条件では ΔT は60s以上の照射時間に対して飽和したが、適正化条件ではその飽和値が12sの照射時間で得られた。つまり適正化条件では、従来条件によって形成された飽和膜厚をもつSiO₂膜を形成するのに必要となる照射時間を1/5に短縮することができた。この短縮分によって、我々が開発したD-RIEプロセスにおけるマスク材の消耗が抑えられる。さらにプロセス時間も短縮できる。

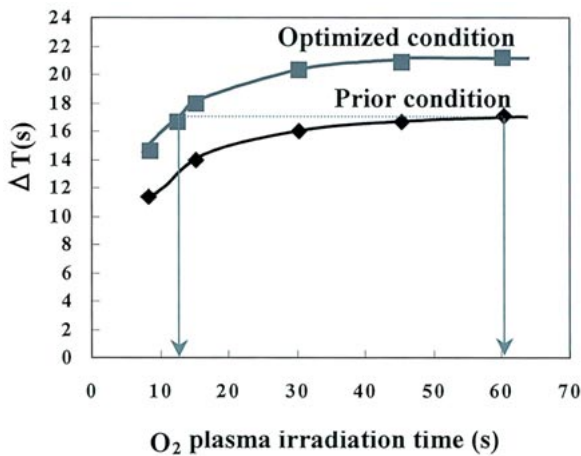


Fig.8 The ΔT dependence on O₂ plasma irradiation time

5. 基板の低温化

また、我々はプロセス時の基板温度の効果に関して調べた。他の報告では、D-RIEプロセス時の基板温度を下げることによって化学的なエッチング要因が抑えられるため横方向へのエッチングが抑えられると述べ

ている⁵⁾。この結果が我々のプロセスに当てはまるのであれば、側壁保護のために必要となるSiO₂膜の膜厚を薄くできるため、O₂プラズマ照射時間を短くできる。

そこで我々は、基板ホルダーの設定温度に対する深さ方向、横方向のエッチレートを調べた。その結果をFig.9に示す。設定温度を5度まで下げたとき、深さ方向のエッチレート低下は20度のときの5%にとどまったが、横方向のエッチレートは1/2に低下した。こうして基板の低温化効果が確認され、設定温度を5度に変更した。

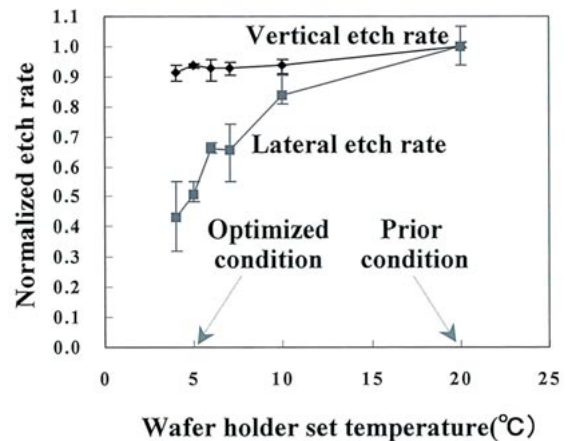


Fig.9 Vertical and Lateral etch rates dependence on wafer holder set temperature

6. プロセス結果の向上

上述したプラズマ条件の適正化と基板の低温化に基づいて、我々が開発したD-RIEプロセスについて従来条件と適正化条件でそのエッチング結果を比較した。この実験では4分間のASEプロセスとO₂プラズマ照射プロセスを交互に10回繰り返した。エッチング後、トレンチの最大幅とマスク開口幅の差で定義されるアンダーカット量とマスク材の消耗 (= マスク厚の減少) を1回あたりのO₂プラズマ照射時間に対して測定した。結果をFig.10に示す。

どちらの条件でも照射時間が長くなるとアンダーカット量が減少することからSiO₂膜形成がO₂プラズマ照射時間と共に進行し、側壁保護能力が向上していることがわかる。一方、スパッタ効果によるマスク材の消耗はO₂プラズマ照射時間と共に増加する。しかし両者を比較すると、適正化条件はSiO₂膜の形成レートを上げることができるため、照射時間を短縮することができる。例えば適正化条件下で1回あたり0.5分間O₂プラズマを照射した場合、従来条件下で1回あ

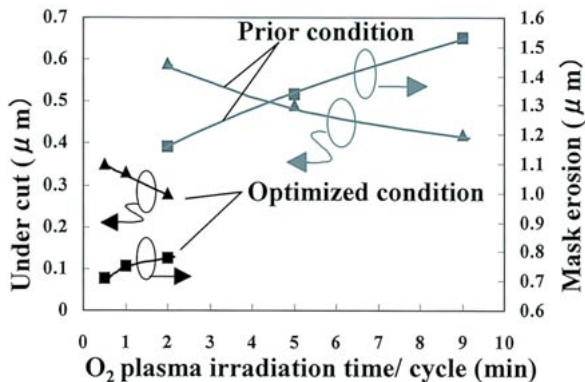


Fig.10 Under cut and mask erosion dependence on the O₂ plasma irradiation time per cycle

たりO₂プラズマを9分間照射した場合よりアンダーカット量が少ないにもかかわらず、マスク材の消耗はその1/2になっている。

このように適正化条件は結果として、従来条件よりSiO₂膜形成レートが向上し、マスク材の消耗がより抑制される。そのため、適正化条件ではSi基板とマスク材(SiO₂マスク)のエッチング選択比を向上でき、かつ必要なプロセス時間を短縮できる。

適正化条件で得られたエッチング例をFig.11とFig.12に示す。これらの例においては、ASEプロセス時のプラズマ条件、および1回あたりのプロセス時間も高アスペクト比エッチングを得るために最適化した。Fig.11にアスペクト比：49(深さ51.2 μm, 幅：1.05 μm)のトレンチを示す。また、Fig.12に最も高いアスペクト比：60(深さ：62.6 μm, 幅：1.05 μm)をもつトレンチを示す。今回の適正化によるエッチング選択比の向上がこれらのエッチングを可能にした。さらに、O₂プラズマ照射時間を大幅に短縮したことで従来条件に比べて同じエッチングをするのに要する

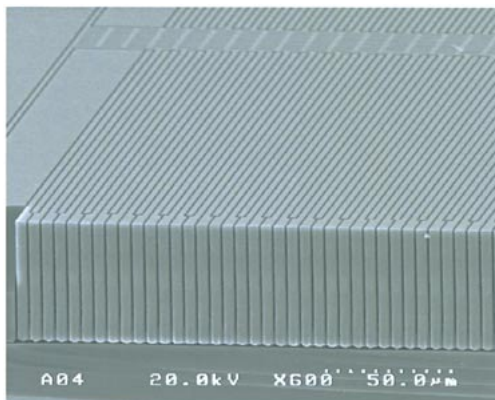


Fig.11 Etching example (Trench depth: 51.2 μm, Trench width: 1.05 μm, Aspect ratio: 49)



Fig.12 Etching example (Trench depth: 62.6 μm, Trench width: 1.05 μm, Aspect ratio: 60)

プロセス時間を2/3に短縮することができた。

7. 結論

本稿では、我々が開発した新しいD-RIEプロセスにおいてマスク材の消滅によるエッチング限界を向上させるため、Si基板とマスク材(SiO₂マスク)のエッチング選択比を向上させた。SiO₂膜の形成レートを上げるためO₂プラズマ条件を適正化し、横方向のエッチレートを低減させるため基板温度を下げた。これらの変更により、マスク材(SiO₂)の消耗が抑えられて見かけ上Si基板とのエッチング選択比が向上し、アスペクト比の最大値は46から60に向上した。またプロセス時間を2/3に短縮することができた。

<参考文献>

- 1) J. Ohara, K. Kano, Y. Takeuchi, N. Ohya, Y. Otsuka and S. Akita. "A NEW DEEP REACTIVE ION ETCHING PROCESS BY DUAL SIDEWALL PROTECTION LAYER." Proceedings MEMS 2000, pp. 277-282.
- 2) 大原, 他: デンソーテクニカルレビュー, Vol.5, No.1 (2000), pp.45 ~ 50
- 3) A. Terrasi, C. Coluzza, and G. Margaritondo. "Ar⁺ bombardment of Si (100) in oxygen atmosphere: Room temperature oxide formation studied by x-ray photoelectron spectroscopy." J. Appl. Phys., Vol. 78 (1995), pp. 3820-3823.

4) Ricardo d' Agostino. " Plasma etching of Si and SiO₂ in SF₆-O₂ mixtures. " J. Appl. Phys., Vol. 52 (1981), pp. 162-167.

5) S. Aauchboun and P. Ranson. " Deep anisotropic etching of silicon. " J. Vac. Sci. Technol. A17 (1999), pp. 2270-2273.



< 著 者 >



大原 淳士
(おおはら じゅんじ)

基礎研究所
マイクロマシン, Si半導体センサ
関連の研究開発に従事



加納 一彦
(かのう かずひこ)

基礎研究所
Si半導体センサ関連の研究開発に
従事



竹内 幸裕
(たけうち ゆきひろ)

基礎研究所
化合物半導体のデバイス・結晶成
長, Si半導体センサ関連の研究開
発に従事



大塚 義則
(おおつか よしのり)

基礎研究所
半導体センサ関連のデバイス・プ
ロセス, 化合物半導体のデバイ
ス・結晶成長に従事